



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

DIGITAALISESTI OHJATTU ANALOGINEN SYNTETISAATTORI

Janne Torvela

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2019

TIIVISTELMÄ

Digitaalisesti ohjattu analoginen syntetisaattori

Janne Torvela

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 29 s. + 1 liite

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tässä opinnäytetyössä esitellään harrastetyönä tehty digitaalista ja analogista elektroniikkaa yhdistelevä elektroninen soitin eli musiikillinen instrumentti, joka mukailee Friedrich Trautwein'in 1900-luvun alkupuolella kehittämän Trautonium-nimisen soittimen rakennetta. Opinnäytetyössä esitetään ja havainnollistetaan kuvin ja kaavioin tehdyn laitteen rakenne ja toiminnallinen kuvaus, sekä joitain suunnitteluun vaikuttaneita lähtökohtia ja pulmia. Näitä ratkaisuja verrataan aikaisemman laitteen rakenteeseen ja toimintaan. Tehdyn laitteen tuottama äänisignaali mitataan oskilloskoopilla ja tietokoneen äänikortilla laitteen toiminnan toteutukseksi.

Asiasanat: syntetisaattori, analoginen synteesi, sulautettu järjestelmä

ABSTRACT

Digitally controlled analog synthesizer

Janne Torvela

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2019, 29 pp. + 1 Appendix

Supervisor(s) at the university: Yrjö Louhisalmi

The purpose of this bachelor's thesis is to present an electronic musical instrument combining both analog and digital electronics. This instrument was built as a hobby project to approximate a musical instrument called the Trautonium, which was developed in the early 1900's by Friedrich Trautwein. This thesis illustrates the structure and operational principles of the built device, noting differences in comparison to the original, and presents some of the design considerations and challenges relevant to the case. The sound signals produced by the device were measured with an oscilloscope and recorded with a computer for verifying the functioning of the device.

Keywords: synthesizer, analog synthesis, embedded system

ALKUSANAT

Tässä työssä esitellään harrastustyönä valmistettu laite, joka syntyi halusta kokeilla käytännössä, miten ääntä voidaan tuottaa elektronisesti ja rakentaa instrumentti, jota voidaan myös soittaa. Laitteeseen kiteytyy lukuisten pienten kokeilujen sarja useamman vuoden ajalta ennen kuin siitä tuli kandidaatintyön aihe. Silti osa ratkaisuksista löydettiin aivan työn kirjoittamisen loppumetreillä keväällä 2019. Työn tarkoitus on dokumentoida näitä ratkaisuja ja kenties innostaa lukijaa kokeilemaan niitä itse.

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa Yrjö Louhisalmea, sekä muita Mekatroniikan ja Konediagnostiikan ryhmän jäseniä arvokkaasta opastuksesta, tuesta, sekä kärsivällisyydestä. Kiitän kaikkia läheisiäni ja ystäviäni kannustuksesta ja tuesta opintojeni aikana.

Oulu, 29.4.2019

Janne Torvela
Janne Torvela

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	7
2 TAUSTA JA HISTORIA	8
2.1 Varhaiset elektroniset instrumentit	8
2.2 Trautonium	10
3 LAITTEEN RAKENNE JA TOIMINTA	14
3.1 Yleiskuvaus	14
3.2 Vastuselementti	15
3.3 Oskillaattorit	16
3.4 Suodatin ja mikseri	18
3.5 Jänniteohjattu vahvistin	19
3.6 Digitaalinen ohjaus	21
3.6.1 Toiminnan kuvaus	21
3.6.2 Ohjelma ja ohjelmointi	22
4 MITTAUKSET JA TULOKSET	25
5 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	28
6 YHTEENVETO	29

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

Liite 1. ATTINY2313 Ohjelmalistaus.

1 JOHDANTO

Sähkötekniikan ja signaalinkäsittelyn kehittyessä edellisen vuosisadan alkupuoliskolla, eräät uuden tiedon ensimmäisistä sovelluskohteista olivat kokeellinen musiikki ja elektroninen äänen synteesi. Monet alan pioneerit kokeilivat uusia menetelmiä äänen ja sähköisten signaalien luomiseen ja rakensivat ensimmäisiä syntetisaattoreiksi tunnistettavia musiikki-instrumentteja. Suurin osa näistä kokeellisista instrumenteista on jäänyt historian sivuun kuriositeetteina ja hyvin harva niistä on enää käytössä alkuperäisessä muodossaan.

Tässä opinnäytetyössä esitellään harrastetyönä tehty elektroninen soitin, joka mukailee vähemmälle huomiolle jääneen Friedrich Trautwein'in kehittämän Trautonium-soittimen rakennetta ja toiminnallisia periaatteita. Valmistetussa uudessa soittimessa analoginen äänen synteesi ja signaalin käsittely yhdistyvät digitaaliseen sulautettuun järjestelmään, joka tulkitsee käyttäjän syötettä ja tuottaa synteesiä ohjaavan signaalin.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on esittää uuden laitteen rakenne ja toiminnallinen kuvaus, sekä joitain sen suunnitteluun ja ratkaisuun vaikuttaneita lähtökohtia ja haasteita. Näitä ratkaisuja verrataan alkuperäisen Trautonium-soittimen rakenteeseen ja toimintaan. Samalla sivutaan pintapuolisesti äänen synteesin yleistä teoriaa ja historiaa siltä osin, kun se on olennaista laitteen kuvauksen kannalta.

Uusi laite on tämän työn kirjoittamisen hetkellä osin viimeistelemätön, ja kaikki esitellyt ratkaisut eivät välttämättä päädy lopulliseen rakenteeseen. Tämän vuoksi kaikkien kaavioissa esiintyvien komponenttien arvoja ei ole voitu ilmoittaa ja osa ilmoitetuista arvoista voi olla summittaisia. Jokainen esitelty osa on kuitenkin kokeiltu ja todettu sellaisenaan tai hyvin pienin muutoksin toimivaksi.

2 TAUSTA JA HISTORIA

2.1 Varhaiset elektroniset instrumentit

1900-luvun alussa nopeassa tahdissa kehittyvä sähkötekniikan tuntemus sai aikaan mullistuksen myös musiikin saralla. Soittajat ja säveltäjät olivat tähän asti olleet sidottuina soittimiensa ominaisuuksiin ja niiden rakenteesta johtuvaan äänialueeseen ja äänen väriin. Esimerkiksi pianolle oli helppo säveltää teoksia, joiden soittamiseen tarvittiin enemmän kuin kymmenen sormea. Lennätin ja puhelimen keksijät olivat kuitenkin onnistuneet tuottamaan keinotekoisia ääntä sähkömekaanisten värähtelijöiden avulla. Radioinsinöörit puolestaan olivat havainneet takaisinkytkennän vaikutuksen vahvistimeen ja löytäneet sähköisen oskillaattorin. Uudet keksinnöt kuten magnetofoni mahdollistivat äänen tuottamisen kopioimalla, ja vanhat instrumentit voitiin mekanisoida tuottamaan musiikkia tavalla, joka ylitti parhaimmankin soittajan kyvyt. (Patteson, T. 2015)

Näiden laitteiden kehittäjät olivat riemuissaan keksintöjensä uusista mahdollisuuksista. Varhaisista kokeilijoista esimerkiksi Jörg Mager kommentoi uuden Spherophone-soittimensa (1921) äärellä, vapaasti suomennettuna: "Käsissäni on koko soinnillinen avaruus: omnitionium!". Syy riemuun oli aiheellinen. Tässä oli kaikessa yksinkertaisuudessaan laite, joka rikkoi kaikkien perinteisten instrumenttien rajat. (Patteson, T. 2015, s. 62)

Erilaisia äänen tallennukseen ja toistoon perustuvia, sekä sähköisesti vahvistettuja tai sähkömekaanisesti automatisoituja soittimia lukuun ottamatta, varhaiset sähköiset soittimet voidaan tämän työn puitteissa jaotella toimintaperiaatteidensa mukaisesti karkeasti kolmeen eri tyyppiin. Nämä selittyvät esimerkkien avulla.

1. Additiivinen synteesi

2. Subtraktiivinen synteesi

3. Moduloiva synteesi

Additiivinen synteesi perustuu yksinkertaisten aaltomuotojen summaamiseen. Näin toimivia soittimia edustaa esimerkiksi Thaddeus Cahillin kehittämä Telharmonium

(1897), jossa sähkömoottorein pyöritetyt hammastetut metallikiekot tuottivat vaihtovirtaa lähelle tuotuihin sähkömagneettisiin käämeihin. Soittaja valitsi useiden, jopa satojen pyörivien kiekkojen tuottamista signaaleista mielivaltaisen yhdistelmän rakentaakseen haluamansa aaltomuodon. Telharmonium-soitin metalliekkoineen ja moottoreineen painoi lähes 200 tonnia. Sen tarkoituksena oli välittää musiikkia puhelinverkon välityksellä jopa 20 000 asiakkaalle yhtä aikaa, hotelleihin, ravintoloihin, teattereihin ja yksityisasuntoihin. Tämän ansiosta Cahill voitaisiin mainita myös hissimusiikin isänä. (Williston J. 2000)

Subtraktiivinen synteesi perustuu signaalin suodattamiseen ja muotoiluun vaimentimia käyttäen. Valmiiksi runsaasti eri taajuuskomponentteja sisältävästä signaalista poistetaan osia, jolloin tuloksena saadaan haluttu aaltomuoto. Näin toimivia laitteita edustaa osittain Friedrich Trautweinin Trautonium (1928). Trautoniumin soittaja säätää laitteen oskillaattorin värähtelytaajuutta ja oskillaattorin tuottama jo valmiiksi useita eri taajuuskomponentteja sisältävä signaali muotoillaan suodattimien avulla. Trautwein päätyi lopulta käyttämään formantteina tunnettuja suodattimia (Patteson, T. 2015, s. 119), jotka ovat periaatteeltaan kapeita kaistanpäästösuodattimia. Ne myös voimistavat tiettyjä taajuusalueita resonanssin avulla ja samalla vaimentavat muita taajuuksia, mikä mukailee fyysisen instrumentin kaikukotelon toimintaa.

Moduloiva synteesi puolestaan voidaan katsoa perustuvan kahden tai useamman mielivaltaisen signaalin yhdistämiseen siten, että signaalit muokkaavat toisiaan. Tässä tapauksessa, kun kaksi toisistaan hieman eroavaa taajuutta yhdistetään, syntyy niiden kesken näennäinen uusi taajuus - huojuunta - joka vastaa alkuperäisten signaalien taajuuksien erotusta. Tätä ilmiötä hyödynsi jo mainittu Jörg Mager, sekä Léon Theremin, jonka Theremin-soittimessa (1928) kaksi radiotaajuista oskillaattoria tuottivat lähes täsmälleen saman taajuuden. Toinen oskillaattoriipiireistä oli kytkettynä antenniin, jolloin soittaja saattoi häiritä oskillaattorin toimintaa ja muuttaa sen taajuutta tuomalla kätensä antennin viereen. Tästä aiheutunut suhteellisen pieni erotus oskillaattorien taajuudessa tuotti kolmannen signaalin, jonka taajuus oli korvin kuultavissa ja se voitiin vahvistaa ääneksi. Magerin Spherophone-soittimessa sama toiminto saatiin aikaan vivulla säädettävän kondensaattorin avulla. (Patteson, T. 2015, s. 62, 63)

Näillä kolmella menetelmällä oli jokaisella omat etunsa ja haasteensa. Additiivinen synteesi esimerkiksi vaati epäkäytännöllisen määrän oskillaattoreita. Toisaalta juuri sen

ansioista sillä voitiin helposti tuottaa myös sointuja yksittäisten sävelten lisäksi. Theremin ja Spherophone taas olivat hyvin vaikeasti hallittavissa ja sen vuoksi ilmaisuvoimaltaan rajallisia. Signaalien taajuusmodulaatiota opittiin hyödyntämään ja hallitsemaan vasta paljon myöhemmin. Trautonium puolestaan näytti välttäneen molemmat pulmat tuottamalla harmonisesti rikkaan äänen yhdellä ainoalla helposti hallittavalla oskillaattorilla. Signaalin muokkaus ja muotoilu aikansa analogisella suodatintekniikalla osoittautui kuitenkin monimutkaiseksi (Patteson, T. 2015, s. 119), joten kaupallista versiota varten Trautwein yksinkertaisti laitetta huomattavasti. (Patteson, T. 2015, s. 125)

Yksinkertaisuutensa takia juuri Trautonium oli oivallinen lähtökohta tälle harrasteprojektille. Sen ymmärtämiseksi ei tarvita erityisesti radiotekniikan tuntemusta, tai tavalliselle harrastelijalle kalliita mittausvälineitä, eikä sen toteuttamiseksi vaadita epätavallisia ja vaikeasti saatavia kalliita komponentteja tai lukuisia mekaanisia osia. Myös aikalaiset kuvailivat laitetta helpoksi valmistaa ja soittaa (Patteson, T. 2015, s. 126). Tietyiltä osin Trautoniumin rakentaminen peruskomponenteista vaatii teknistä osaamista ja joitain osia joudutaan valmistamaan itse, mutta vaatimustaso riippuu lähinnä tekijän kunnianhimosta.

2.2 Trautonium

Alkuperäinen Trautonium perustuu relaksaatio-oskillaattorille. Se rakentui neonkaasulla täytetystä purkausputkesta (Patteson, T. 2015, p. 118), ja myöhemmin vastaavalla periaatteella toimivasta Thyatron-putkesta (Patteson, T. 2015, s. 127). Näissä matalapaineisen kaasun täyttämään lasiputkeen muodostuu ionisoitunut kanava, jota pitkin sähkövirta pääsee kulkemaan. Kaavio Thyatron-putkeen perustuvasta oskillaattorista on nähtävissä kuvasta 1. Kerran muodostuttuaan purkauskanava pysyy johtavana, kunnes virta katkeaa muista syistä. Tästä syntyy hystereesi, joka mahdollistaa piirin värähtelyn. Kun purkausputki kytketään rinnakkain kuvan 1 kondensaattorin K kanssa ja kytkentään tuodaan virtaa, kondensaattorin jännite kasvaa, kunnes se ylittää ionisoitumisrajan, jonka jälkeen purkausputki tyhjentää kondensaattorin varauksen ja kierros alkaa alusta. (Calvert J. B. 2003)

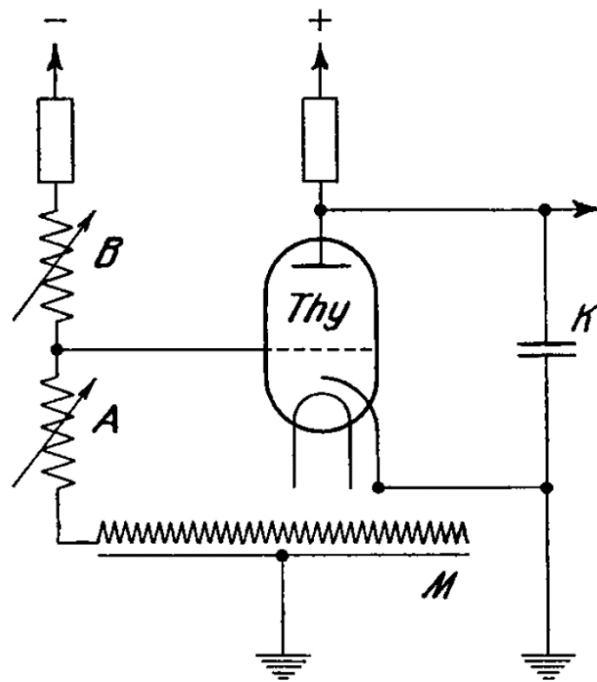


Abb. 1 Prinzipschaltung
des Trautoniums.

Kuva 1. Trautoniumin oskillaattori. (Sala O. 1950)

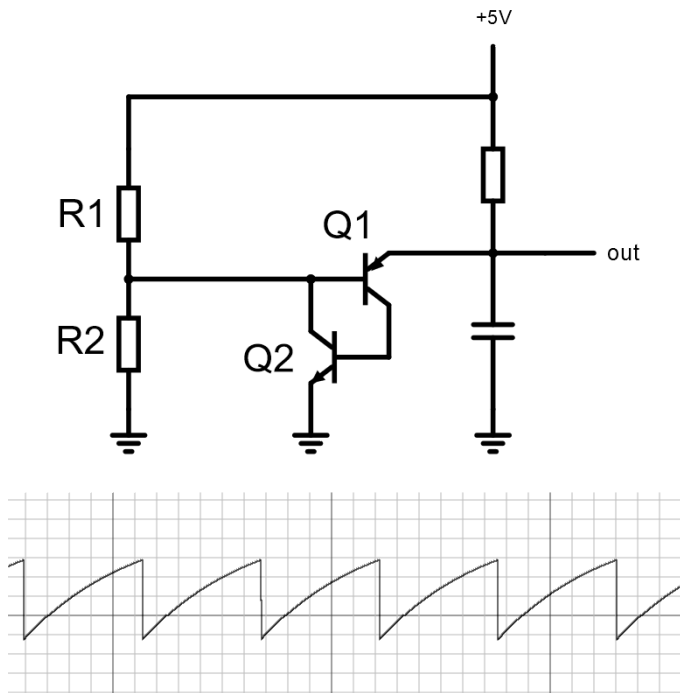
Trautoniumin oskillaattorin hallinta tapahtui muuttamalla purkausputken läpilyöntijännitettä. Thyatron-putken ominainen tarkoitus on toimia kytkimenä, joka kytkee virran, kun sen hilaelektrodille tuodaan positiivinen varaus. Thyatron pysyy sulkeutuneena, kun hilaelektrodi varataan negatiiviseksi suhteessa kuvassa 1 näkyvään maadoitettuun elektrodiin. Purkauskanava kuitenkin avautuu, mikäli putken läpi vaikuttava jännite on riittävän korkea ionisoimaan kaasun hilaelektrodin jännitteestä huolimatta. Tämä vaadittu jännite muuttuu hilaelektrodin jännitteen muuttuessa (Calvert J. B. 2003), joten soittaja saattoi valita soitettavan taajuuden muuttamalla Thyatron-putken hilajännitettä enemmän tai vähemmän negatiiviseksi.

Soittaminen tapahtui metallisella otelaudalla, jonka ylle oli viritetty vastuslanka. Metallinen otelauta on merkitty kuvassa 1 kirjaimella M ja sen yläpuolelle sijoitettu aaltoviiva esittää vastuslankaa. Kun soittaja painoi langan otelautaan, virtapiiri sulkeutui ja lanka muodosti yhdessä kuvan 1 vastusten A ja B kanssa jännitejakajan, joka puolestaan ohjasi purkausputken hilan jännitettä. Kun soittaja irrotti otteensa, putken hilajännite vaihtui vahvasti negatiiviseksi ja oskillaattori pysähtyi.

Oskillaattorin tuottama sahalaitaa muistuttava aalto ei sellaisenaan ollut erityisen miellyttävää kuunneltavaa, joten äänisignaali ohjattiin suodatinpiireihin, jotka olivat soittajan säädettävissä. Langan kosketuskohdasta riippuva jännite voitiin sovittaa piirin vastusten keskinäisiä suhteita muuttamalla halutulle äänialalle. Kun soitin oli viritetty, soittajalla oli apunaan sarja liikuteltavia vipuja, jotka voitiin asettaa langan ylle haluttujen nuottien kohdalle. Otelaudan alle sijoitettu hiilivastus salli soittajan muuttaa sävelen voimakkuutta painamalla otelautaa. Tuloksena oli soitin, joka yhdisti soittotyyliltään viulun ja pianon. (Patteson, T. 2015, s. 117, 118, 127) Kuvassa 2 näkyy vuoden 1933 Volkstrautonium.



Kuva 2. Volkstrautonium. (Wikimedia Commons 2010)



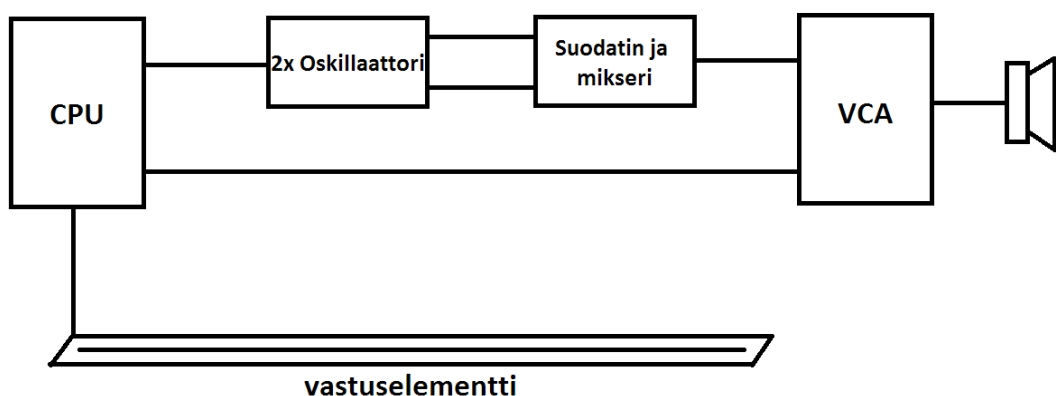
Kuva 3. Relaksaatio-oskillaattori transistorein toteutettuna ja simuloitu signaali.

Kuvassa 3 vastaava relaksaatio-oskillaattori on toteutettu tavallisilla transistoreilla. Piirillä näkyy simuloitu esimerkki piirin tuottamasta aaltomuodosta. Kondensaattorin varautuessa sen jännite nousee, kunnes jännite ylittää riittävästi transistorin Q1 kannalla vaikuttavan jännitteen ja transistori avautuu. Tällöin kondensaattoria varaava virta pääsee Q1 läpi transistorin Q2 kannalle, joka avautuu ja vetää Q1 kannalla vaikuttavan jännitteen alas. Nyt kondensaattorin jännite on huomattavan paljon korkeampi ja Q1 pysyy auki, kunnes kondensaattorin jännite laskee niin alas, että Q2 kynnysjännite alittuu ja transistori ei pysy enää auki. Piiriin muodostuu hystereesi, joka pitää transistoreita auki, kunnes kondensaattorin varaus on lähes kokonaan purkautunut. Tuloksena on sahalaitainen aalto, jonka amplitudi ja taajuus muuttuvat vaihtamalla vastusten R1 ja R2 keskinäistä suhdetta. Kun kytkentään lisätään vastuslanka ja otelauta, sekä pieni kaiutin, saadaan tuloksena yksinkertainen Trautonium.

3 LAITTEEN RAKENNE JA TOIMINTA

3.1 Yleiskuvaus

Harrasteprojektina valmistettu laite käyttää esikuvanaan vuoden 1933 Volkstrautoniumia. Se koostuu neljästä päälohkosta, jotka ovat esitettynä kuvassa 4. Ensimmäisessä lohkoissa mikroprosessori (CPU) mittaa vastuselementin resistanssia ja pyrkii havaitsemaan käyttäjän tuottamat kosketustapahtumat. Kun prosessori havaitsee kosketuksen, se tuottaa kosketuskohtaa vastaavan jännitesignaalin, sekä logiikkasignaalin, joka kertoo myöhemmille lohkoille havainnosta. Toisessa lohkoissa kaksi jänniteohjattua oskillaattoria vastaanottavat mikroprosessorin tuottamaa jännitesignaalia ja muodostavat sen perusteella jatkuvan taajuussignaalin. Kolmas lohko edustaa Trautoniumin suodatinpiiriä, mutta sisältää kaistanpäästösuodattimien sijaan kaksi epälineaarista vahvistinta, jotka muokkaavat signaalin harmonista taajuussisältöä. Vahvistinten ulostulot yhdistyvät mikserissä. Neljännessä lohkoissa sijaitsee jänniteohjattu vahvistin (VCA – Voltage Controlled Amplifier), joka muuttaa signaalin voimakkuutta otelaudan asennon mukaan ja tuottaa lopullisen vahvistetun äänisignaalin, jota voidaan kuunnella kuulokkeilla tai kaiuttimesta. Laitteen ulkomuoto kirjoitushetkellä käy ilmi kuvasta 5. Valokuvassa etualalla on laitteen elektroninen piiri rakennettuna koekytalentälevylle, mikroprosessorin ohjelmointilaite ja matkakaiutin.



Kuva 4. Laitteen lohkolaavio.



Kuva 5. Valokuva laitteesta.

3.2 Vastuselementti

Alkuperäisestä poiketen uudessa laitteessa vastuslangan tilalla on toiselta puolelta muovipäällystetty metallinauha ja varsinainen vastuselementti on sijoitettu otelaudan pintaan metallinauhan alle. Tähän on ensisijaisesti syynä Trautweinin käyttämän alkuperäisen kaltaisen vastuslangan heikko saatavuus. Lisäksi, nykyiset elektroniset komponentit eivät siedä yhtä hyvin staattisen sähköön purkauksia ja mitattavat jännitteet ovat huomattavasti vähäisempiä, joten rakenteen kääntäminen suojaa mittaavaa mikroprosessoria vaurioilta ja häiriöiltä. Vastuselementin yläpuolinen metallinauha on kytketty laitteen nollapotentiaaliin, joten mahdolliset maatasojen erot yhteen kytkettyjen laitteiden välillä eivät kytkeydy käyttäjän sormien kautta nauhaa mittaavaan mikroprosessoriin. Vastuselementti esitetään kuvassa 6.

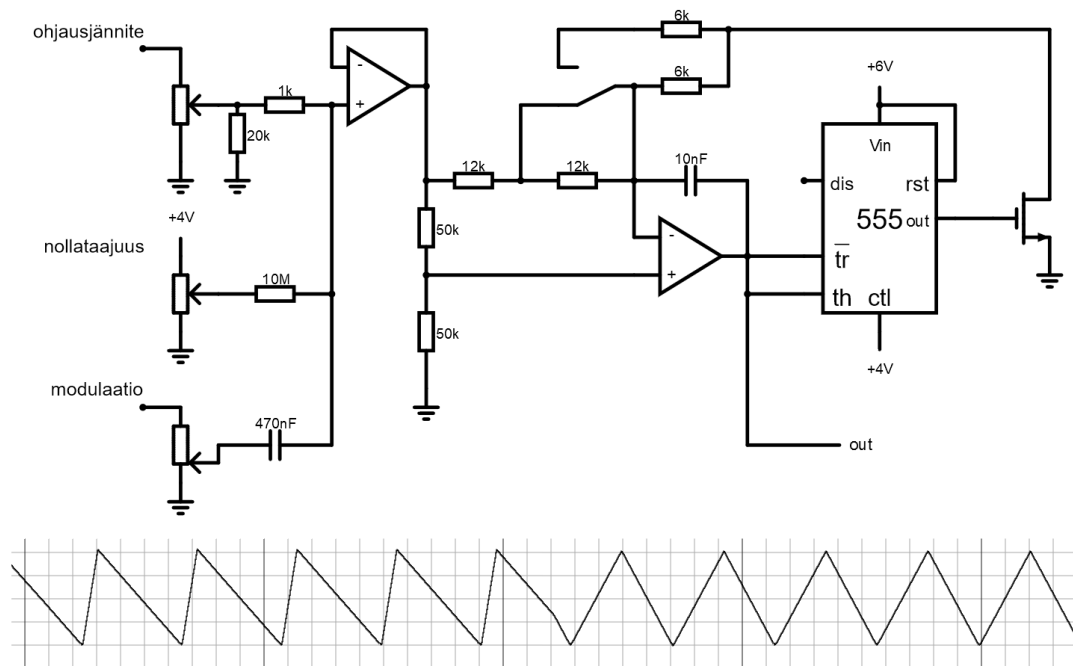


Kuva 6. Vastuselementti.

Vastuselementti valmistettiin liimaamalla ohuen, noin 0,5 millimetrin paksuisen muovilevyn pintaan kaksi saman vahvuista levyä siten, että niiden väliin jäi tasainen 5 millimetrin levyinen ura. Tämän jälkeen valmistettiin apteekin aktiivihiilestä hieromalla erittäin hienoa hiilipölyä, johon sekoitettiin pieni määrä alumiinista viilattua jauhoa. Syntynyt seos lisättiin 1:1 tilavuussuhteessa taidetarvikeliikkeestä saatavaan tavalliseen akryylimaaliin, josta saatiin vaivaamalla tiivis ja nopeasti kuivuva massa. Muovilevyn ura täytettiin massalla ja kuivuttuaan massa hiottiin hiomapaperilla muovin pinnan tasaan. Valmistettu levy leikattiin 20 millimetriä leveäksi nauhaksi ja liimattiin soittimen otelautaan. Näin valmistetun vastusnauhan pituudeksi muodostui noin 340 millimetriä ja sähkövastukseksi noin $16\text{ k}\Omega$ päästä päähän. Akryylimaali toimii nauhan sidosaineena ja kutistumattomana liimana, joka on kuivuttuaan yhä joustavaa. Vastusnauhaa voitiin siten käsitellä ilman pelkoa nauhan murtumisesta.

3.3 Oskillaattorit

Laitteen jänniteohjatut oskillaattorit ovat rakennettu operaatiovahvistimista ja komparaattoreista. Toteutuksessa signaalin amplitudi voidaan pitää vakiona taajuudesta riippumatta, mikä mahdollistaa myöhemmän suodatinlohkon toiminnan. Oskillaattori voi tuottaa valinnan mukaan saha- tai kolmioaaltoa ja se voidaan virittää eri taajuusalueille ja taajuusvasteille. Oskillaattori koostuu summaavasta vahvistimesta, integroivasta vahvistimesta ja Schmitt-trigger komparaattorista. Sen rakenne on esitetty kuvassa 7. Kuvan alaosassa näkyy simuloitu esimerkki oskillaattorin tuottamista aaltomuodoista.



Kuva 7. Jänniteohjattu oskillaattori ja simuloitu aaltomuoto.

Kuvan 7 piirikaaviossa vasemmalla ensimmäinen operaatiovahvistin toimii summaavana vahvistimena sisään tuleville signaaleille. Ylhäältä lukien ensimmäinen signaali on mikroprosessorin tuottama ohjausjännite ja sitä skaalaava säätövastus. Oskillaattori saadaan seuraamaan toista halutulla etäisyydellä sävelasteikolla skaalaamalla ohjausjännitettä. Esimerkiksi oktaavin ylempänä, tai 3/4 oktaavia matalammalla taajuudella.

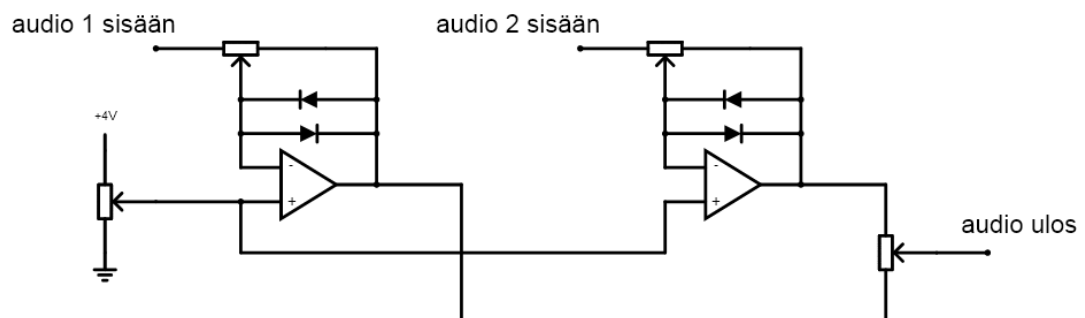
Toiseksi ylin signaali on oskillaattorin nollataajuuden säätö. Mikroprosessorin tuottamasta ohjaussignaalista on etukäteen vähennetty vakio, jota korotetaan takaisin nollataajuuden säädöllä. Tällä varmistetaan, että molemmat oskillaattorit toimivat samalla tavalla. Nollataajuuden säädön avulla voidaan myös virittää yksi oskillaattori seuraamaan toista pienellä vakiotajuuden erolla.

Alin signaali moduloi oskillaattorin taajuutta. Oskillaattorit kytkeytyvät ristiin ulostulosta toisen oskillaattorin modulaatituloon ja käyttäjä voi säätää modulaation voimakkuutta. Muuttuva modulaatiosignaali pyrkii edistämään tai jättämään oskillaattorin vaihetta toisen oskillaattorin suhteen, joten kytkentä toimii myös yksinkertaisena vaihelukkona. Säätämällä modulaation nollaan oskillaattorit toimivat toisistaan riippumatta.

Varsinainen oskillaattori koostuu kääntävästä integroivasta vahvistimesta ja sitä seuraavasta komparaattorista. Schmitt-trigger komparaattori seuraa integraattorin tuottamaan jännitettä ja vaihtaa integraattorin tuottaman jänniterampin suuntaa sille asetetun jännitetason mukaan. Integraattoria ympäröivien vastusten keskinäinen suhde määrää signaalin rampin kulmakertoimen suhteessa ohjaavaan signaaliin laskevalla ja nousevalla jaksolla. Piirissä käytetty 555 IC on kytketty toimimaan Schmitt-trigger komparaattorina.

3.4 Suodatin ja mikseri

Alkuperäisestä Trautoniumista poiketen rakennetun laitteen suodatinpiiri ei perustu vaimentimiin tai resonanssiipiireihin, vaan epälineaariseen vahvistimeen. Piirissä toteutuu yksinkertainen logaritminen vahvistin, joka hyödyntää diodin ominaiskäyrää leikkaamaan vahvistettavan signaalin huiput ja vääristämään sen harmonista taajuussisältöä. Sopivalla vahvistuskertoimella kolmiomainen aalto alkaa muistuttaa siniaaltoa, ja vahvistusta lisätessä se muuttuu pyöristetyksi kanttiaalloksi. Tämän vuoksi on olennaista, että oskillaattorin tuottaman signaalin amplitudi pysyy samana taajuudesta riippumatta. Lopuksi kahden vahvistimen tuottamasta signaalista muodostetaan painotettu summa. Lisäefektinä toimii vahvistinten nollatasen säätö, jolla voidaan tuottaa toispuoleinen aaltomuodon vääristymä. Piirin rakenne käy ilmi kuvasta 8.

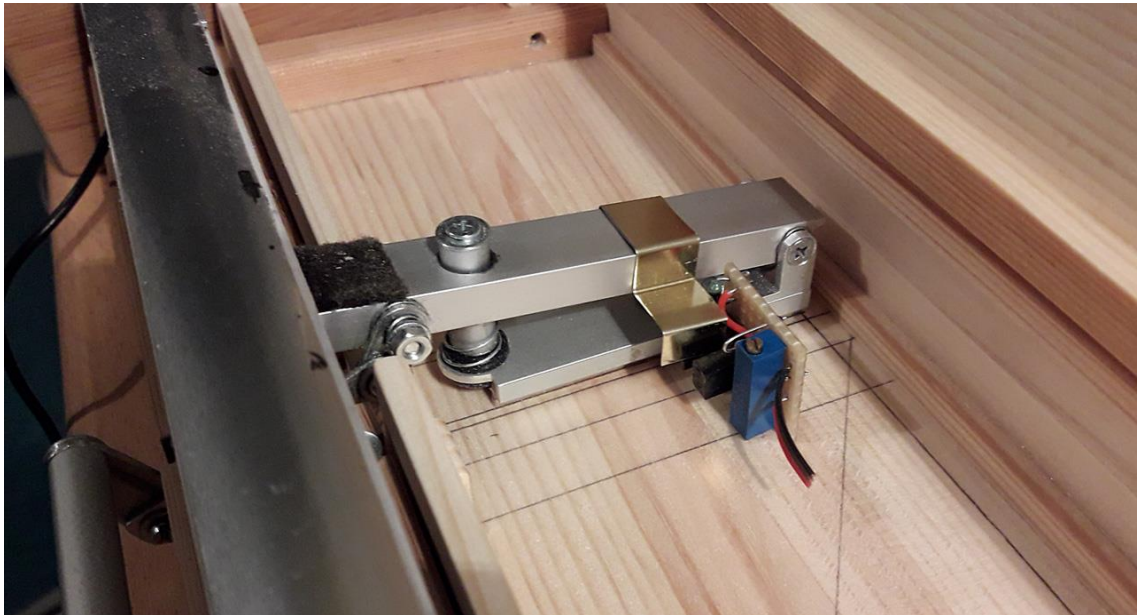


Kuva 8. Suodatin ja mikseri.

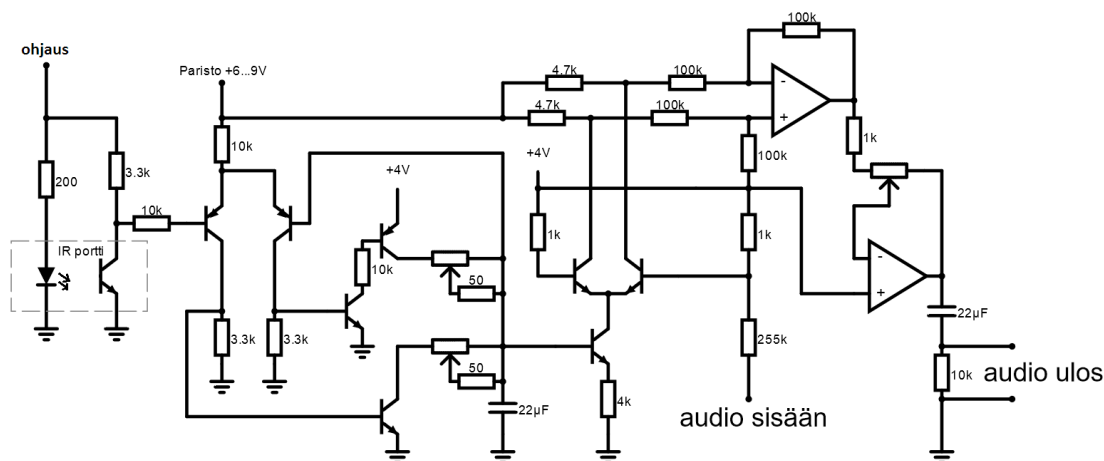
3.5 Jänniteohjattu vahvistin

Alkuperäisen Trautoniumin äänen "dynamiikan" säätö tapahtui hiilivastuksen avulla (Patteson, T. 2015, s. 127). Tällä on ilmeisesti tarkoitettu eräänlaista hiilikapselia, jonka sähkövastus muuttuu puristuksen alla ja siten vaikuttaa signaalin amplitudiin. Vastaava rakenne olisi mahdollista tuottaa nykyäänkin, mutta helpompi ratkaisu on valokennoon perustuva portti. Tämän vuoksi laitteen otelauta on nivelletty jousen varaan ja otelaudan painaminen laskee metallisen levyn valoportin väliin.

Valoporttina käytetään infrapunalla toimivaa TCST1103 optista anturia. Anturi tuottaa lineaarisesti muuttuvan virtavasteen, kun optisen haarukan valokenno peitetään yhden millimetrin matkalla (Vishay Semiconductors 2011). Kuvasta 9 näkyy otelaudan vipumekanismi ja valoportin mahdollinen sijoitus. Valoporttia hyödynnetään tuottamaan jännitesignaali vahvistimelle, jonka rakenne käy ilmi kuvasta 10.



Kuva 9. Vipumekanismi ja valoportti.



Kuva 10. Jänniteohjattu vahvistin ja valoportti.

Vahvistinpiiri saa sisäänsä logiikkasignaalin tunnistetusta kosketuksesta, jolloin valoportti aktivoituu ja tuottaa otelaudan asentoa vastaavan jännitesignaalin. Transistoreista koostettu differentiaalipari vertaa piirissä kondensaattorin jännitettä valoportin tuottamaan jännitteeseen ja kytkee kondensaattorin joko piirissä käytettyyn referenssijännitteeseen tai maahan. Kondensaattorin varautumista tai purkautumista hidastetaan säätövastuksin, jolloin piiristä muodostuu jänniteseuraaja, jonka nousu- ja laskuaikaa voidaan säätää.

Hidastettu jännitesignaali ohjaa toisen differentiaaliparin läpi kulkevaa virtaa. Kun tälle differentiaaliparille tuotujen jännitteiden ero on riittävän pieni, parin läpi kulkeva virta jakaantuu kahteen haaraan jännite-eron mukaisesti. Toisen transistorin kannalle tuotu äänisignaali ohjaa virtaa haarasta toiseen ja takaisin. Haarasta toiseen siirtyvä virta muodostaa haaroihin sijoitettujen vastusten välille jännitesignaalin, jonka amplitudi riippuu differentiaaliparin läpi kulkevasta kokonaisvirrasta. Näin aikaansaatu signaali johdetaan erovahvistimeen, joka siirtää signaalin piirin referenssijännitteen tasolle. Kuvassa käytetään referenssijännitteen esimerkkinä +4 Volttia, mutta todellisuudessa sen tulisi olla lähellä suodattimen ja mikserin nollatason jännitettä.

Jännitetason siirron jälkeen signaali vahvistetaan vielä kerran kääntävällä vahvistimella kuunneltavalle äänenvoimakkuudelle. Ratkaisun ansiosta soitetun nuotin iskua voidaan hidastaa, ja nuotti voidaan jättää soimaan hetkeksi nauhan kosketuksen jälkeen. Samalla valoportin mekanismista johtuvat häiriöt suodattuvat pois.

3.6 Digitaalinen ohjaus

3.6.1 Toiminnan kuvaus

Laitteen digitaalinen osa koostuu Microchip Technology Inc. valmistamasta ATtiny2313 mikro-ohjaimesta. Sen tehtävänä on mitata kosketuspiste metallinauhalla ja tuottaa sitä vastaava ohjausjännite, sekä kosketuksen ilmaiseva logiikkasignaali. Tätä varten vastuselementin rinnalle on kytketty 100 nF kondensaattori ja mitattavan vastuksen päät ovat kytketty ohjaimen kahteen digitaaliseen lähtöön. Ohjain varaa kondensaattorin muuttamalla ensimmäisen digitaalisen lähdön tilaan "yksi" ja toisen "nolla", jolloin ensimmäisen lähdön jännite nousee ja toisen laskee. Tämän jälkeen se vapauttaa ensimmäisen lähdön jännitteen ohjauksen ja muuttaa sen digitaalseksi tuloksi. Tämän seurauksena kondensaattorin varaus alkaa purkautumaan vastuselementin läpi ja ohjain mittaa purkautumiseen kuluvan viiveen digitaalisen sisääntulon logiikkatason muutoksesta nolnaan.

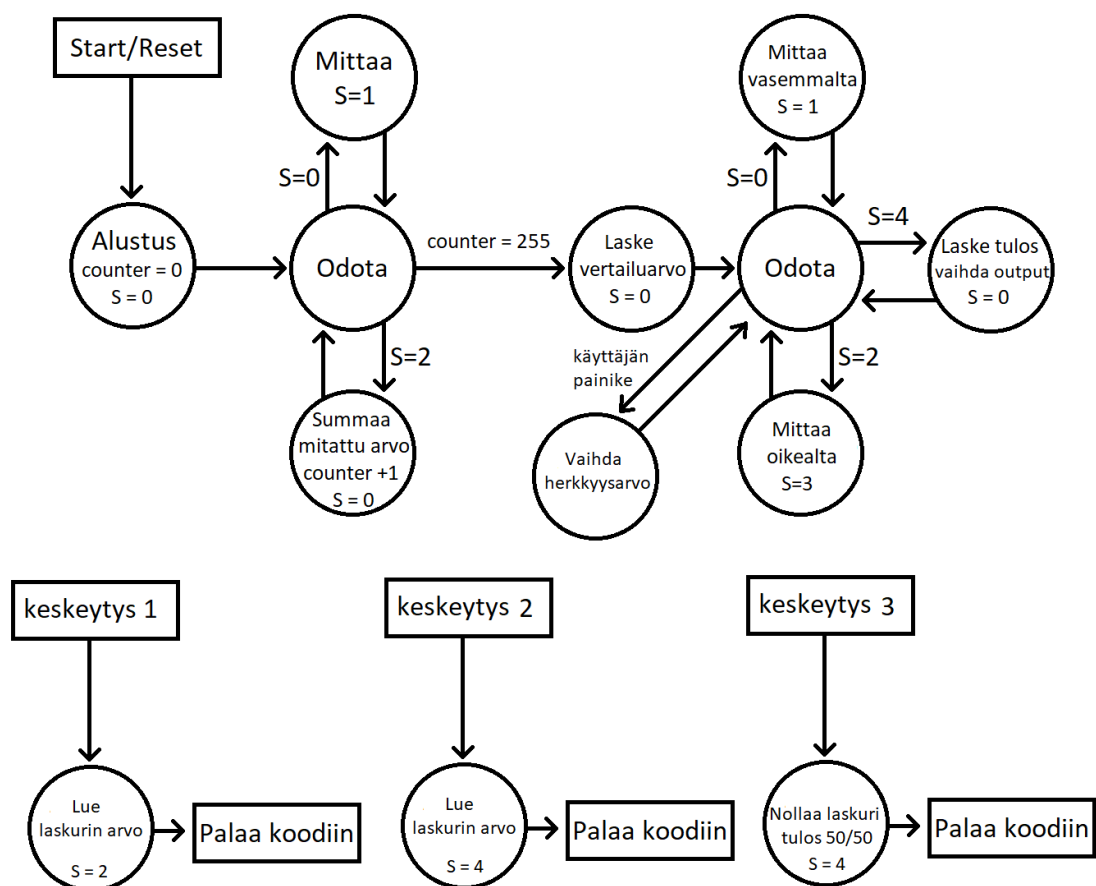
Käynnistyshetkellä ohjelman alussa ohjain mittaa vastuselementin aiheuttaman viiveen ja muodostaa siitä vertailuarvon. Tämän jälkeen ohjain alkaa mittaamaan vastusta toistuvasti, vaihtaen jokaisella mittauskerralla ulos- ja sisääntulojen loogista järjestystä. Kun käyttäjä koskettaa metallinauhalla vastuselementin pintaa, ohjain saa vuorotellen mittaustuloksia kosketuskohdan vasemmalta ja oikealta puolelta. Kokonaiseen mittaussjaksoon kuluu tyypillisesti noin yksi millisekunti.

Ohjelma pystyy vertaamaan tulosta aikaisemmin muodostettuun vertailuarvoon ja hylkäämään tuloksen, mikäli kosketus ei ole riittävän voimakas. Vastaavasti, vertaamalla mitattuja tuloksia alkuperäiseen mitattuun arvoon, ohjelma pystyy tunnistamaan kosketuskohdan leveyden ja arvioimaan sen keskikohdan nauhalla, jolloin kahden pisteen kosketus tulkitaan yhdeksi kosketuspisteeksi näiden puolella välissä.

Kun nauhaa painetaan tavallisesti yhdellä sormella, metallinauhan ja vastuselementin välinen sähkövastus muuttuu painalluksen voimakkuuden mukana, koska nauha koskettaa vastusta vain pieneltä alalta. Yhteen ohjaimen digitaalisista tuloista on kytketty painike, jota painamalla käyttäjä voi opettaa ohjaimelle halutun painallusvoiman. Ohjelma tallentaa senhetkisen vasemman- ja oikeanpuolisen mittaustuloksen summan toiseksi vertailuarvoksi, jonka alittuessa ohjelma katsoo kosketuksen tapahtuneeksi ja

Arduinon bootloader -ohjelmaa, vaan piiri ohjelmoitiin sellaisenaan käyttäen hyödyksi valmistajan datalehteä ja WinAVR kokoelman ohjelmakirjastoja, sekä lukuisia satunnaisia verkosta löydettyjä ohjelmaesimerkkejä.

Ohjelman rakenne noudattaa pääpiirteittäin tilakoneen toimintamallia. Ohjelmassa määritellään muuttuja, joka pitää kirjaa missä loogisessa toimintatilassa ohjelma kulloinkin on. Toimintatila määrää seuraavaksi suoritettavan toiminnon ja sitä edeltävät ehdot. Viiveen mittausta toteutettiin käyttämällä mikropiirin sisäistä laskuria ja keskeytysfunktioita, jolloin muun ohjelman suoritusta voitiin jatkaa mittauksen kuluessa. Kirjoitushetkellä tuorein ohjelmalistaus on nähtävissä liitteenä. Kuvasta 12 käy ilmi ohjelman looginen rakenne. Jokainen ympyrä edustaa ohjelman osiota, joka toteuttaa ympyrään merkityn toiminnon tai muutoksen. Osioon siirrytään tietyn ehdon täytyttyä ja siirtymäehto on merkitty siirtymää esittävän nuolen viereen. Mikäli siirtymällä ei ole ehtoa, se toteutuu aina.



Kuva 12. Ohjelman looginen rakenne.

Ohjelma alkaa virran kytkentähetkellä. Piirin alustavien toimintojen jälkeen tilamuuttuja S asetetaan arvoon 0. Samalla määritellään myös muuttuja "counter", joka pitää kirjaa mittauskerroista. Tämän seurauksena ohjelma siirtyy välittömästi mittaustilaan, jossa se varaa ulkoisen kondensaattorin, virittää laskurikellon ja ensimmäisen keskeytyksen, ja siirtyy takaisin odottamaan. Kun ensimmäistä keskeytystä vastaavan piirin sisään tulon logiikkataso muuttuu, prosessori keskeyttää senhetkisen koodin suorittamisen ja siirtyy määrättyyn keskeytysfunktioon. Keskeytysfunktio kirjaa muistiin laskurikellon lukeman ja vaihtaa tilan S arvoon 2, jonka jälkeen prosessori jatkaa koodin suoritusta keskeytyneestä kohdasta. Ohjelma havaitsee tilanteen muuttuneen ja suorittaa seuraavan toiminnon, jossa mitattu arvo summataan yhteen edeltävien kierrosten arvoon ja mittauslaskuria kasvatetaan, minkä jälkeen kierros alkaa alusta.

Kun mittauksia on summattu yhteen 256 kappaletta, ohjelma laskee summasta keskiarvon, joka edustaa vastuselementin koko pituutta. Näin saatua arvoa käytetään myöhemmin tunnistamaan nauhan kosketuksen voimakkuus. Seuraavaksi ohjelma siirtyy varsinaiseen mittauskiertoon, joka toimii lähes samalla tavalla, mutta käyttää kahta eri keskeytysfunktioita, jotka tallentavat tuloksensa kahteen eri muistipaikkaan. Kun tilaehto S osoittaa, että molemmat mittaukset ovat suoritettu, ohjelma siirtyy laskemaan varsinaisen tuloksen. Varsinaisen mittauskierron aikana muuttujaa "counter" käytetään pyörivänä indeksinä muistitaulukkoon, joka sisältää viimeiset kahdeksan mitattua tulosta.

Ohjelmassa on käytössä vielä kolmas keskeytysfunktio, joka suoritetaan, kun kellolaskurin arvo ylittää määrätyn arvon. Normaalisti ohjelma suoriutuu yhdensuuntaisesta mittauksesta viimeistään 1...2 millisekunnissa ja tätä keskeytystä ei koskaan suoriteta. Kuitenkin, jos mittaukseen kuluu yli neljä millisekuntia, keskeytysfunktio nollaa kellolaskurin ja määrää molempien mittaustuloksien arvoiksi saman luvun. Näin ohjelmassa ei voi tapahtua vahingossa ylivuotovirhettä tai jakoa nollalla.

Ohjelma vie käännettynä piiriltä noin 1800...1900 tavua ohjelmamuistia, riippuen käytetystä optimointitasosta. Tämä vastaa noin 90% piirin 2 kilotavun kapasiteetista. Etukäteen määritellyt muuttujat varaavat 71 tavua RAM muistia, joka vastaa 56% käytettävissä olevasta muistista.

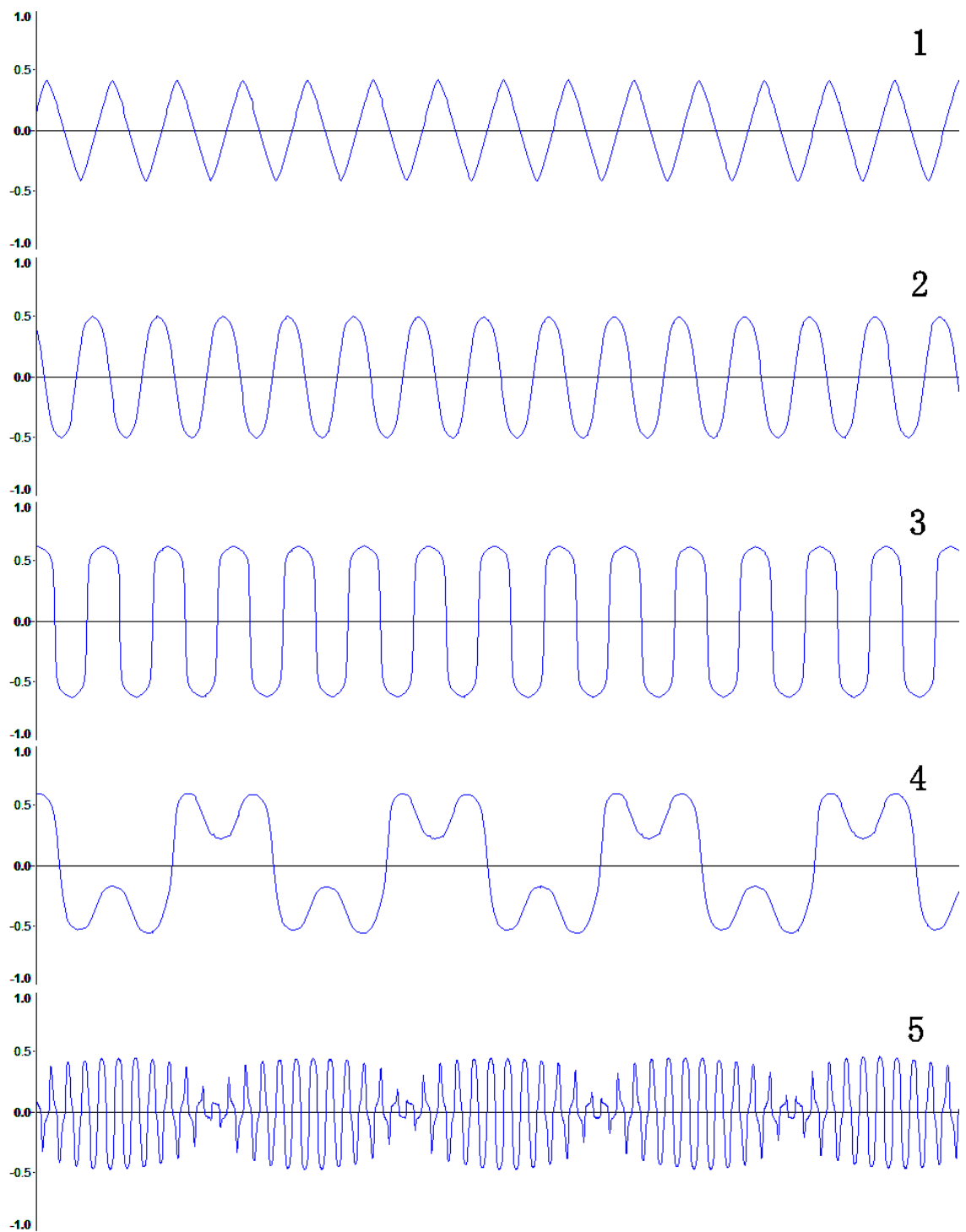
4 MITTAUKSET JA TULOKSET

Laitteen sähköinen piiri rakennettiin koekytkentälevylle ja piiriin lisättiin tarvittavat virransyötön komponentit. ATtiny2313 mikro-ohjain ohjelmoitiin ja jokaisen osalohkon toimivuus varmistettiin mittaamalla ja kokeilemalla. Kun laitteen havaittiin toimivan tarkoitetulla tavalla, se kytkettiin tuottamaan jatkuvaa signaalia tasaisella äänenvoimakkuudella noin 500 Hz taajuudella. Tämän jälkeen laitteen ulostulo tarkastettiin Leader LCD-100 kannettavalla oskilloskoopilla ja todettiin, että laitteen tuottaman signaalin jännite on turvallisissa rajoissa ja aaltomuoto toivotun kaltainen. Tuotetun signaalin aaltomuoto oskilloskoopin ruudulla näkyy kuvassa 13.



Kuva 13. Oskilloskoopin näyttämä aaltomuoto.

Tämän jälkeen laitteen ulostulo kytkettiin PC-tietokoneen mikrofoniiliitäntään ja laitteen tuottama äänisignaali nauhoitettiin samalla muuttaen oskillaattoreiden ja suodatinlohkon säädettäviä vastuksia. Tallennukseen käytettiin ilmaista Audacity-ohjelmaa. Ohjelmasta otetuista ruutukaappauksista koostettu kokoelma aaltomuodoista on nähtävissä kuvasta 14.



Kuva 14. Kokoelma laitteesta mitattuja aallonäytteitä.

Kuvan 14 kokoelma aallonäytteitä sisältää seuraavat aaltomuodot: 1) kolmioaalto, 2) sinimuotoinen aalto, 3) pyöristynyt kanttiaalto, 4) yhtä oskillaattoria toisella moduloimalla tuotettu aaltomuoto, 5) kahden oskillaattorin välinen huojunta.

Mittauksien jälkeen oskillaattoreiden ohjaus kytkettiin takaisin ATtiny2313 mikro-ohjaimeen. Koska laitteen valoportti ei ollut mittaushetkellä asennettuna paikoilleen, valoportti ohitettiin asettamalla sen väliin paperia. Tämän jälkeen suoritettiin lyhyt soittokoe ja havaittiin, että kosketusnauha toimii paikoitellen heikosti. Nauha irrotettiin ja vastuselementin pintaa hangattiin kevyesti pehmeällä lyijykynällä kauttaaltaan, jonka jälkeen nauha kiinnitettiin takaisin. Tämän jälkeen suoritettiin toinen soittokoe, ja todettiin että aiempi vika on poistunut ja nauha toimii hyvin.

Subjektiiivisesti arvioituna laitteen tuottama ääni soittokokeen aikana oli pehmeä ja miellyttävä. Vaihtaminen kolmioaallostsa sahalaitaiseen aaltomuotoon tuotti pillimäisen ja lievästi narisevan äänen, johon suodatinlohkon säädöillä ei vaikuttanut olevan yhtä suurta vaikutusta kuin kolmiomaiseen aaltomuotoon.

5 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittausten ja koesoiton perusteella todettiin, että laite toimii aiotulla tavalla ja sillä pystyy tuottamaan hallitusti useita erilaisia aaltomuotoja. Laitteella voi soittaa musiikkia ja sen sointi on miellyttävä. Laitteen kahden oskillaattorin, suodattimen ja mikserin toiminta eroaa merkittävästi alkuperäisestä laitteesta, jonka takia suora vertailu esikuvana käytettyyn Volkstrautionium-soittimeen on vaikeaa. Tehty laite on alkuperäistä huomattavasti monimutkaisempi.

Koska laitteen mekaaninen rakenne ja soittotapa muistuttaa riittävästi alkuperäistä Trautionium-soitinta, piiriä voisi yksinkertaistaa huomattavasti ja palata takaisin kohti alkuperäistä laitetta. Tällöin soittimesta voisi muodostaa esimerkiksi rakennussarjan.

Toisaalta käyttömekanismiin voi myös vaihtaa. Lisäksi piirin idean pohjalta voisi kehittää täysin uudenlaisen soittimen. Laitteen mikroprosessori mahdollistaa erilaisten syöttölaitteiden liittämisen ja laitteeseen voidaan toteuttaa etäohjaus esimerkiksi standardinmukaista MIDI-sarjaväylää käyttäen.

6 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä esiteltiin harrastetyönä tehty soitin, joka mukailee Friedrich Trautweinin 1900-luvun alussa kehittämää Trautonium-soitinta. Työssä käytiin läpi joitain varhaisia elektronisia soittimia ja niiden toimintaperiaatteiden eroja. Trautoniumin toimintaperiaate havainnollistettiin piirikaavion ja kirjallisuudesta löytyneen tiedon avulla, jonka lisäksi esitettiin samalla periaatteella toimiva virtapiiri transistoreilla toteutettuna.

Harrastetyönä valmistetun soittimen rakenne esitettiin valokuvien ja lohkokaaavion avustuksella. Osakokonaisuuksien toiminta selitettiin kuvin ja kaavioin. Laitteessa käytetyn mikro-ohjaimen ohjelman toimintaperiaate ja toiminta selitettiin. Tarkka ohjelmalistaus löytyy liitteenä.

Laitteelle suoritettiin joukko mittauksia, joiden tuloksena saatiin näytteitä laitteen tuottamista aaltomuodoista. Tuloksena saatiin kolmiomainen aalto, siniaalto, pyöristynyt kanttiaalto ja kaksi eri tavoin moduloitunutta monimutkaisempaa aaltomuotoa. Laitteen soittamista kokeiltiin.

Laite todettiin toimivaksi ja kykeneväksi muodostamaan useita erilaisia aaltomuotoja. Subjektiiivisesti arvioiden laitteen sointi oli miellyttävä. Toiminnaltaan laite ei kuitenkaan täysin vastannut esikuvaansa, vaan siitä muodostui huomattavasti monimutkaisempi. Todettiin että laitetta voisi yksinkertaistaa takaisin alkuperäisen suuntaan, tai kehittää edelleen uudelleenlaiseksi soittimeksi.

LÄHDELUETTELO

Calvert J. B. 2003. Vacuum Tubes. Thyatron. [verkkoaineisto]. [viitattu 26.4.2019].
Saataavissa: <http://mysite.du.edu/~etuttle/electron/elect27.htm#Thyra>

Patteson, T. 2015. Instruments for New Music: Sound, Technology, and Modernism. California: University of California Press. [Viitattu 23.4.2019]. ISBN 978-0-520-96312-2 (sähköinen). Saataavissa: DOI:10.1525/luminos.7

Sala, O. 1950. Das Mixtur-Trautonium. Physikalische Blätter. 6: 390-398. [viitattu 20.4.2019]. Saataavissa: DOI:10.1002/phbl.19500060902

Vishay Semiconductors. 2011. TCST1103, TCST1202, TCST1300 Transmissive Optical Sensor with Phototransistor Output [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.4.2019]. Saataavissa: <https://www.vishay.com/docs/83764/tcst1103.pdf>

Wikimedia Commons, 2010 Volkstraonium, Telefunken Berlin, 1933/1934 Musikinstrumentenmuseum Berlin, Kat.-Nr. 5264 [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.4.2019]. Saataavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Volkstraonium_MIM.jpg (Käytetty luvalla: Public Domain)

Williston J. 2000. Thaddeus Cahill's Teleharmonium. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.4.2019]. Saataavissa: <http://synthmuseum.com/magazine/0102jw.html>

```
/*
* ATTINY2313 Ohjelmalistaus
*
* Liukupotentiometrin mittaus RC aikaviiveenä.
* Tuloksen muunnos x -> 2^x
* skaalaus 0...2^16 paloittain määritellyn funktion avulla
* DA-muunnos pseudo 16-bit PWM kahdella 8-bit kanavalla
* Käyttöliittymä: kosketusherkkyden asetus, painonappi
*
*Liukupotentiometri:
*
* (INT0)
* (INT1)
*
*DA-muunnos (PWM):
*
* (OC0A)
* (OC0B)
*
*Painonappi:
* (PD0)
*
*Signaali ulos (gate):
* (PD1)
*
*Debug signaali oskilloskoopille:
*(PB0)
*/

#define F_CPU 8000000UL           //Kerrotaan kellotaajuus delay.h:lle

//apumakrot IO käsittelyyn
//asetta bitti
#define set_high(var, mask) ((var) |= (uint8_t)(1 << mask))
//poista bitti
#define set_low(var, mask) ((var) &= (uint8_t)~(1 << mask))

//Käytetyt kirjastot
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>

//muuttujien määrittely ja muistin varaus
//etukäteen lasketut muuntokäyrän pisteet RAM muistiin
const uint16_t points[16] =
{4096, 4871, 5793, 6889, 8192, 9742, 11585, 13777, 16384, 19484, 23170,
27554, 32768, 38968, 46341, 65535};

//Globaalit muuttujat
//Nämä ovat olemassa kaikille funktioille ja varaavat muistia
//Muualla määritellyt muuttujat varataan dynaamisesti
volatile uint32_t vas = 0;
volatile uint32_t oik = 0;
volatile uint32_t value = 0;
volatile uint16_t divider;
volatile uint16_t ratio;
volatile uint16_t lastvalue[8];
volatile uint16_t threshold;
volatile uint16_t sensitivity = 0;
volatile uint8_t state = 0;
volatile uint8_t counter = 0;
```

```

int main(void)
{
    cli();    //keskeytykset pois käytöstä

    //alustetaan IO
    //DDRx data direction register x = A,B,D
    //PORTx Pin output register

    DDRB = (1<<PB2) | (1<<PB0);    //PWM ulos PB2 : OC0A, PB0 debug
    DDRD = (1<<PD1) | (1<<PD5);    //PWM ulos PD5 : OC0B, PD1 gate
    PORTB = 0;    //kaikki B lähdöt maahan
    PORTD = 0b00010011;    //PD0,PD1,PD4 ylösveto, muut maahan

    //kellolaskureiden rekisterit:
    //TTCR__ : Timer Counter Control Register
    //TIMSK : Timer interrupt mask register
    //Bittimaskit:
    //COM__ : compare output mode bit
    //WGM__ : waveform generator mode bit
    //CS__ : clock select bit - asettaminen käynnistää kellon

    //PWM kellon asetus timer 0 kanavat A ja B
    TCCR0A = (1<<COM0A0) | (1<<COM0A1) | (1<<COM0B0) | (1<<COM0B1) |
    (1<<WGM00) | (1<<WGM01);
    TCCR0B = (1<<CS00);

    //16-bit kello timer 1
    TCCR1B = (1<<WGM12); //CTC mode
    TCNT1 = 0;    //nollataan timer 1
    OCR1A = 32000;    //timeout aika 4 ms
    TCCR1B |= (1<<CS00); //käynnistä timer 1
    TIMSK |= (1<<OCIE1A); //compare match interrupt timer 1

    sei(); //keskeytykset päälle

    //kalibraatio mittaa nauhan samoin päin 256 kertaa ja laskee keskiarvon
    do
    {
        if (state == 0)
        {
            //varataan kondensaattori
            set_high(DDRD, PD2); //INT0 suunta ulos
            set_high(DDRD, PD3); //INT1 suunta ulos
            set_high(PORTD, PD2); //INT0 1
            set_low(PORTD, PD3); //INT1 0
            _delay_us(25);    //varaa 25 us
            GIMSK = (1<<INT0); //keskeytys INT0 käyttöön
            //nollataan 16 bit laskuri.
            //Alempi tavu kirjoittaa koko 16-bit Rekisterin H ja L.
            TCNT1H = 0;
            TCNT1L = 0;
            set_low(DDRD, PD2); //INT0 inputiksi
            set_low(PORTD, PD2); //INT0 ylösveto pois
            state = 1;    //tila: "mitataan"
        }

        if (state == 2)
        {
            value = value + vas;
            state = 0;
            counter++;
        }
    }
    while(counter<255);
}

```

```

threshold = (value / 256);           //vertailuarvo

while(1)    //PÄÄOHJELMA
{
    //tilakoneen tilat
    if (state == 0)    //"Odottaa uutta mittausta"
    {
        counter++;    //datapuskurin laskuri
        set_high(DDRD, PD2); //INT0 ulos
        set_high(DDRD, PD3); //INT1 ulos
        set_high(PORTD, PD2); //INT0 1
        set_low(PORTD, PD3); //INT1 0
        _delay_us(25); //varataan kondensaattori
        GIMSK = (1<<INT0); //keskeytys INT0 käyttöön
        TCNT1H = 0; //
        TCNT1L = 0; //nollataan kello
        set_low(DDRD, PD2); //INT0 inputiksi
        set_low(PORTD, PD2); //INT0 ylösveto pois
        state = 1; //tila:"mitataan vasemmalta"
    }

    if (state == 2) //"Mittaus valmis vasen"
    {
        set_high(DDRD, PD2); //INT0 ulos
        set_high(DDRD, PD3); //INT1 ulos
        set_low(PORTD, PD2); //INT0 0
        set_high(PORTD, PD3); //INT1 1
        _delay_us(25); //varataan kondensaattori
        GIMSK = (1<<INT1); //keskeytys INT1 käyttöön
        TCNT1H = 0; //
        TCNT1L = 0; //nollataan kello
        set_low(DDRD, PD3); //INT0 inputiksi
        set_low(PORTD, PD3); //INT0 ylösveto pois
        state = 3; //tila: "mitataan oikealta"
    }

    if (state == 4) //vasen ja oikea mitattu
    {
        set_high(PORTB, PB0); //debug
        //potentiometrin mitattu näennäinen pituus (R||N)
        divider = vas + oik;

        //jos nauha on "lyhyempi" kuin asetettu raja-arvo
        //gate signaali ulos ("nauha koskee")
        //Oteaan tulos ylös
        if ((divider) < (sensitivity))
        {
            set_high (PORTD, PD1);
            lastvalue[(counter)&0b111]=((threshold-vas)<<16)
            / ((2*threshold - divider));
        }
        //gate signaali ulos ("Nauha on irti")
        if ((divider) > (sensitivity)) set_low(PORTD, PD1);
    }
}

```



```

value = 0;
value = value + lastvalue[0]; //looppia rullattu auki
value = value + lastvalue[1]; //optimoinnin takia
value = value + lastvalue[2];
value = value + lastvalue[3];
value = value + lastvalue[4];
value = value + lastvalue[5];
value = value + lastvalue[6];
value = value + lastvalue[7];
ratio = (value / 8); //~8ms keskiarvo

//Lineaarinen interpolaatio tunnettujen pisteiden välillä
uint8_t index = (ratio/4096);
uint32_t remainder = (points[index+1] - points[index]);
uint32_t value_out =
points[index] + ((ratio - index*4096)*remainder)/4096;

//asetetaan PWM lähdöt A ja B
OCR0B = value_out & 0xFF; //alemmat 8 bittiä
OCR0A = (value_out>>8); //ylemmät 8 bittiä

state = 0; //aloita alusta
set_low(PORTB, PB0); //debug
}

//vapaasti rullaava koodi, saattaa keskeytyä
if ((PIND & (1<<PD0)) == 0) sensitivity = divider;
}

} //main() loppuu tähän

//Keskeytysfunktiot

//ulkoisen keskeytys INT0
ISR(INT0_vect)
{
vas = TCNT1L; //ota ylös laskurin lukema alin 8 bittiä
vas = vas + (TCNT1H<<8); //ylin 8 bittiä
set_low(GIMSK, INT0); //poista keskeytys
state = 2; //mittaus valmis vasen"
}

//ulkoisen keskeytys INT1
ISR(INT1_vect)
{
oik = TCNT1L; //ota ylös laskurin lukema alin 8 bittiä
oik = oik + (TCNT1H<<8); //ylin 8 bittiä
set_low(GIMSK, INT1); //poista keskeytys
state = 4; //mittaus valmis vasen ja oikea"
}

//Jos int0 tai int1 ei tuota keskeytystä, jotain on irti.
//ennen pitkää timer/counter tuottaa itse keskeytyksen
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
set_low(GIMSK, INT1); //poista keskeytykset
set_low(GIMSK, INT0);
state = 4; //mittaus valmis vasen ja oikea"
oik=10000;
vas=10000;
set_high(PORTB, PB0); //debug pulssi
_delay_us(100);
set_low(PORTB, PB0);
}

```